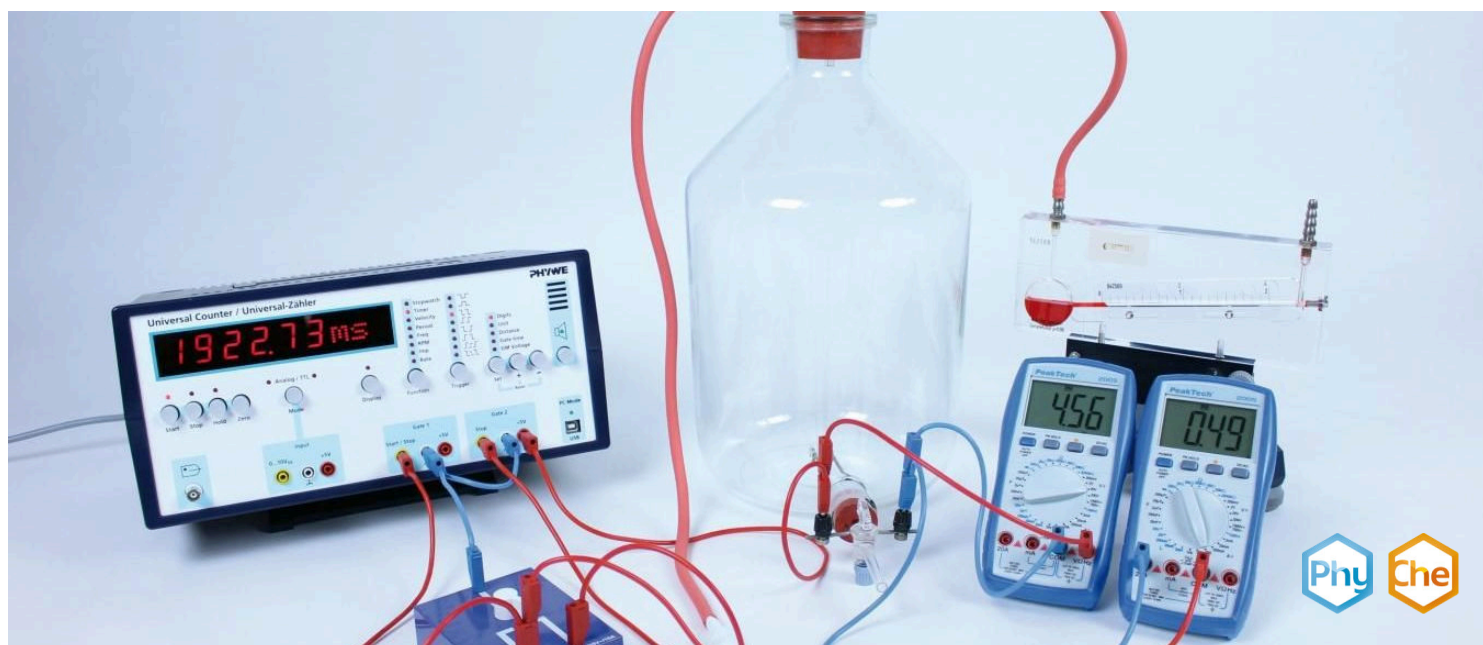


# Capacidad calorífica de los gases



Física

Termodinámica / Termodinámica

Energía térmica

Química

Fisicoquímica

Termoquímica/ Calorimetría

ciencia aplicada

Ingeniería

Energías renovables

Principios básicos



Nivel de dificultad

medio



Tamaño del grupo

2



Tiempo de preparación

45+ minutos



Tiempo de ejecución

45+ minutos

This content can also be found online at:



<http://localhost:1337/c/606a65d0c4022300031478aa>

PHYWE



## Información para el profesor

### Aplicación

PHYWE

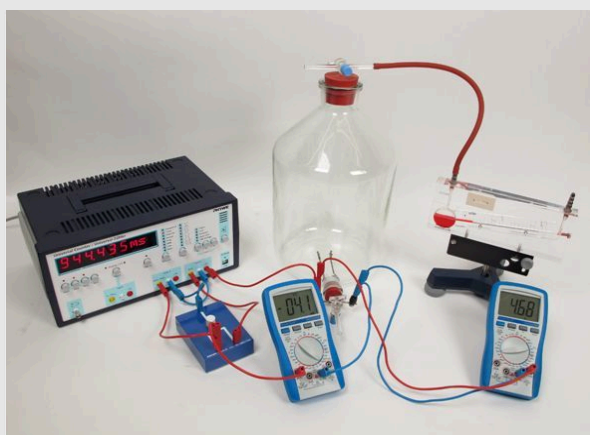


Fig.1: Montaje experimental para la determinación de  $C_V$

La comprensión de la capacidad calorífica de los gases es fundamentalmente importante para la industria energética, ya que el calentamiento de los gases se utiliza para producir electricidad. Este experimento puede servir para obtener un primer conocimiento del comportamiento térmico de los gases.

## Información adicional para el profesor (1/2)

PHYWE



### Conocimiento previo



### Principio

Los conocimientos previos necesarios para este experimento se encuentran en la sección de principio.

Se añade calor a un gas en un recipiente de vidrio mediante un calentador eléctrico que se enciende brevemente. El aumento de la temperatura provoca un aumento de la presión, que se mide con un manómetro. En condiciones isobáricas, el aumento de temperatura provoca una dilatación del volumen, que puede leerse con una jeringa. Las capacidades térmicas molares  $C_V$  y  $C_P$  se calculan a partir del cambio de presión y de volumen, respectivamente.

## Información adicional para el profesor (2/2)

PHYWE



### Objetivo



### Tareas

El objetivo de este experimento es investigar la capacidad calorífica del aire.

1. Determinar las capacidades térmicas molares del aire a volumen constante  $C_V$
2. Determinar las capacidades térmicas molares del aire a presión constante  $C_P$

## Principio (1/4)

PHYWE

La primera ley de la termodinámica puede ilustrarse especialmente bien con un gas ideal. Esta ley describe la relación entre el cambio de energía interna  $dU$  el calor intercambiado con el entorno  $dQ$  y el trabajo realizado por el sistema en general. En nuestro caso, el trabajo realizado es el trabajo presión-volumen que se traduce en un aumento de volumen  $dV$  manteniendo constante la presión  $p$ .

$$dQ = dU_i + p dV(1)$$

La capacidad calorífica molar  $C$  de una sustancia resulta de la cantidad de calor absorbido  $dQ$  y del cambio de temperatura  $dT$  por mol, siendo  $n$  el número de moles:

$$C = \frac{1}{n} \cdot \left( \frac{dQ}{dT} \right)(2)$$

Se distingue entre la capacidad calorífica molar a volumen constante  $C_V$  y la capacidad calorífica molar a presión constante  $C_P$ . Según las ecuaciones (1) y (2) y en condiciones isocóricas ( $v = \text{const}$ ,  $dV = 0$ ), se cumple lo siguiente:

## Principio (2/4)

PHYWE

$$C_V = \frac{1}{n} \cdot \left( \frac{dU_i}{dT} \right)(3)$$

En condiciones isobáricas ( $p = \text{constante}$ ;  $dp = 0$ ):

$$C_P = \frac{1}{n} \cdot \left( \frac{dU_i}{dT} + p \frac{dV}{dT} \right)(4)$$

De la ecuación (3) se deduce que la capacidad calorífica molar  $C_V$  es una función de la energía interna del gas. La energía interna se puede calcular con la ayuda de la teoría cinética de los gases con el número de grados de libertad  $f$  y la constante universal de los gases  $R$ :

$$U_i = \frac{1}{2} f \cdot R \cdot T \cdot n(5)$$

Teniendo en cuenta la ecuación (3) se deduce que:

## Principio (3/4)

PHYWE

$$C_V = \left(\frac{f}{2}\right) R(6)$$

Diferenciación de la ecuación de estado de los gases ideales

$$pV = nRT(7)$$

da lo siguiente para una presión constante:

$$p \frac{dV}{dT} = n \cdot R(8)$$

De la relación (4) obtenemos

$$C_p = \left(\frac{f+2}{2}\right) R(9)$$

Con las relaciones (6) y (9) se deduce que la diferencia entre  $C_V$  y  $C_P$  para los gases ideales es igual a la constante universal de los gases  $R$ .

$$C_p - C_V = R(10)$$

El número de grados de libertad de una molécula está en función de su estructura. Todas las partículas tienen tres grados de libertad de traslación. Las moléculas diatómicas tienen dos grados adicionales de libertad de rotación alrededor de los ejes principales de inercia.

## Principio (4/4)

PHYWE

Las moléculas triatómicas tienen tres grados de libertad de rotación. El aire se compone principalmente de oxígeno (aproximadamente el 20 %) y nitrógeno (alrededor del 80 %). Como primera aproximación, se puede suponer que lo siguiente es cierto para el aire:

$$f = 5$$

$$C_V = 2.5 R$$

$$C_V = 20.8 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

y

$$C_p = 3.5 R$$

$$C_p = 29.1 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

## Material

Posición	Material	Artículo No.	Cantidad
1	MANOMETRO DE PRECISION	03091-00	1
2	PHYWE Contador universal	13601-99	1
3	Multímetro digital, 3 1/2-visualizado de caracteres	07122-00	2
4	FRASCO DE MARIOTTE, 10 L	02629-00	1
5	LLAVE UNA VIA,RECTA,VIDRIO, D.8MM	36705-00	1
6	LLAVE DE TRES VIAS, VIDRIO, D.8MM	36732-00	1
7	TAPON GOMA 31/30MM,ESPEC.PERFOR.	39258-14	1
8	TAPON GOMA 59.5/50.5MM,1PERF. 7MM	39268-01	1
9	Manguera de conexión, d int = 6 mm, l = 1 m	39282-00	2
10	TUBO DE SILICONA, DIAM. INTER.3MM	39292-00	1
11	ELECT.D.NIQUEL,D 3MM,CON ZOCALO	45231-00	2
12	ALAMBRE NIQUEL-CROMO,D.0,1MM-100M	06109-00	1
13	TIJERAS,L140MM	64625-00	1
14	INTERRUPTOR A PALANQUITA,UNIPOLAR	06005-00	1
15	Cable de conexión, 32 A, 500 mm, rojo	07361-01	4
16	Cable de conexión, 32 A, 250 mm, rojo	07360-01	1
17	Cable de conexión, 32 A, 500 mm, azul	07361-04	1
18	Cable de conexión, 32 A, 250 mm, azul	07360-04	1
19	CABLE DE CONEX. 100 mm, AZUL	07359-04	2
20	Jeringas 10 mililitros, con cierre Luer (cierre roscado de ajuste hermético), 100 unid.	02590-10	1
21	CON.P.TUB.REC.DIAM.INT.3-5/6-10 mm	47517-01	1
22	Monitor electrónico climático con pantalla LCD	87997-10	1
23	Base trípode PHYWE	02002-55	1

PHYWE



## Montaje y ejecución

### Montaje (1/3)

PHYWE

- Realizar el montaje experimental según las figuras 1 y 2 respectivamente.
- Introducir los dos electrodos de níquel en dos agujeros del tapón de goma de tres agujeros y fije los tornillos de los terminales en los extremos inferiores de los electrodos.
- Atornillar dos trozos de alambre de cromo-níquel, de unos 15 cm de longitud cada uno, en las pinzas situadas entre estos dos electrodos, de modo que estén conectados eléctricamente en paralelo. Los cables no deben tocarse entre sí.
- Introducir la llave de paso unidireccional en el tercer orificio del tapón e introduzca el tapón así preparado en la abertura inferior de la botella. Prestar especial atención a los cables que deben sobresalir en el centro de la botella.

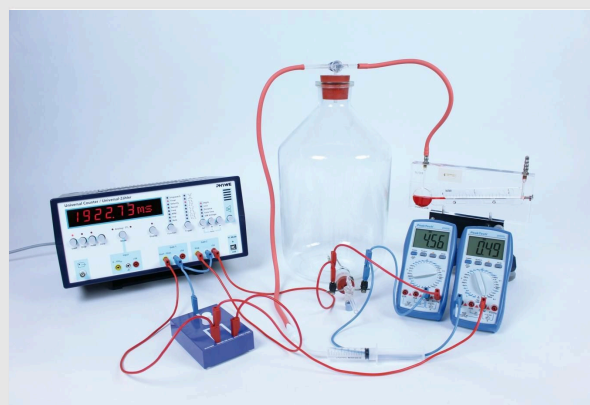


Fig. 2: Montaje experimental para la determinación de  $C_p$

## Montaje (2/3)

PHYWE

- Introducir el segundo tapón, equipado con la llave de paso de tres vías, en la abertura superior de la botella (Fig. 1) y conectar el manómetro de precisión a la botella con un trozo de tubo.
- El manómetro debe colocarse exactamente en posición horizontal.
- Está equipado con un nivel de burbuja para facilitar el ajuste correcto. Utilice los tornillos de ajuste de la base del trípode para alinear el manómetro completamente horizontal.
- El manómetro debe llenarse con el aceite que se suministra con el aparato.

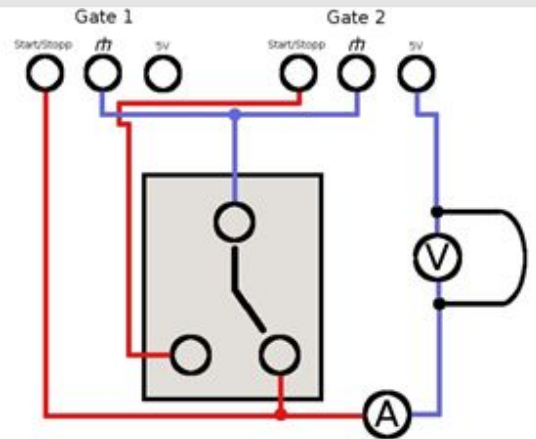


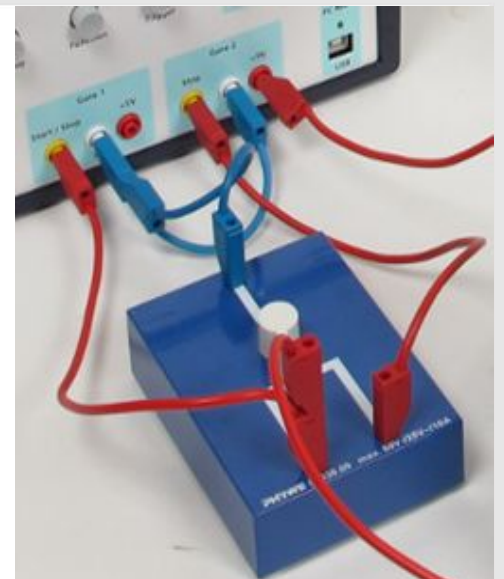
Fig. 3: Circuito esquemático para medir el tiempo de calentamiento.

## Montaje (3/3)

PHYWE

- La escala está ahora calibrada en hPa.
- Elegir la escala de 2 hPa o 4 hPa modificando el ángulo de inclinación del manómetro. Para estas mediciones, 2 hPa son suficientes, así que déjalo en posición horizontal.
- Una de las salidas de 5 V del contador universal sirve como fuente de alimentación. El circuito eléctrico se ilustra en la Fig. 3 y la Fig. 4.
- Para determinar  $C_P$  Conectar la jeringa a la botella a través de la llave de paso de tres vías (compare la Fig. 2).

Fig. 4:  
Conexión del  
interruptor  
de dos vías y  
el contador.





## Ejecución (1/5)

PHYWE

- Para cada tarea, realizar al menos diez mediciones.
- El tubo de subida del manómetro debe estar bien humedecido antes de cada medición.
- Como el contador tiene que medir el tiempo de calentamiento elija los siguientes ajustes:

Función: Temporizador

...de la que se desprende:

- Determinar la corriente que circula por el cable calefactor y la tensión por separado al final de la serie de medición.

Para ello, conectar uno de los multímetros digitales en serie como amperímetro y el otro en paralelo como voltímetro (compare la Fig. 3). Determinar la presión atmosférica, necesaria para los cálculos, con la ayuda de la estación meteorológica.

## Ejecución (2/5)

PHYWE

### Tarea 1:

- Iniciar y detener el procedimiento de medición accionando el interruptor de dos vías.
- El procedimiento de medición debe ser lo más breve posible (menos de dos segundos).
- El grifo de tres vías debe colocarse de manera que conecte la botella con el manómetro de precisión.
- Al calentarse, la presión en la botella comenzará a aumentar.
- Leer el aumento máximo de presión inmediatamente después de la cesación del proceso de calentamiento.
- Después de cada medición, espere un tiempo suficiente hasta que el gas en el volumen se enfríe de nuevo a temperatura ambiente, recuperando así la presión ambiental.

## Ejecución (3/5)

PHYWE

- La corriente eléctrica que fluye durante las mediciones no debe ser demasiado fuerte, es decir, debe ser lo suficientemente débil como para limitar el aumento de presión debido al calentamiento del gas a un máximo de 1 hPa.
- Por esta razón, puede ser necesario utilizar sólo un cable calefactor o reducir la corriente eléctrica en la fuente de alimentación.

### Tarea 2:

- Iniciar y detener el procedimiento de medición accionando el interruptor de dos vías.
- El procedimiento de medición debe ser lo más breve posible (menos de dos segundos).
- Durante la medición, el grifo de tres vías debe colocarse de manera que conecte la jeringa y el manómetro con la botella.

## Ejecución (4/5)

PHYWE

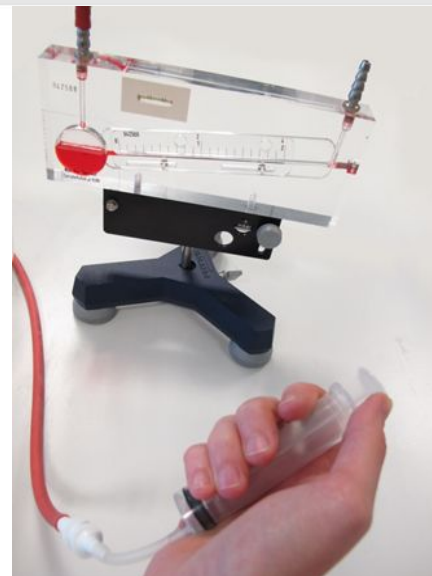
- Al calentarse, la presión en la botella comenzará a aumentar.
- Como se quiere determinar la capacidad calorífica a presión constante hay que compensar el aumento de presión aumentando el volumen a través de la jeringa.
- Se puede sostener la jeringa en la mano y utilizar el pulgar para empujar suavemente el émbolo.
- Cuando el calentamiento se detiene, el volumen del gas en la botella sigue aumentando por un momento.
- Tener cuidado de notar el punto de inflexión cuando el volumen comienza a disminuir de nuevo porque el gas comienza a enfriarse. En este momento la presión debe tener su valor inicial y empezar a descender mientras que tú ya has dejado de aumentar el volumen.
- Se podrá leer el aumento de volumen directamente en la escala de la jeringa. Es posible que se necesite algo de práctica hasta que se pueda mantener la presión bastante constante durante toda la medición y reconocer el punto de inflexión correctamente.

## Ejecución (5/5)

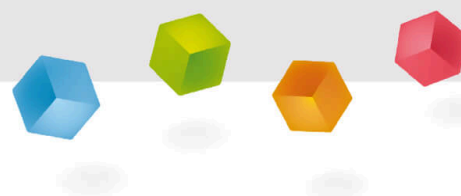
PHYWE

- Después de cada medición, reajustar el volumen inicial y esperar hasta que el gas se enfríe de nuevo a temperatura ambiente.
- Antes de iniciar una nueva medición, tanto el volumen de la jeringa como la presión deben haber recuperado sus valores iniciales.

Fig. 5: Para la segunda tarea, accionar la jeringa con una mano mientras acciona el interruptor con la otra.



PHYWE



## Resultados

## Tarea 1 (1/5)

PHYWE

En condiciones isocóricas, el aumento de temperatura  $dT$  produce un aumento de presión  $dp$ . La medición de la presión da lugar a una diminuta alteración del volumen que debe tenerse en cuenta en el cálculo:

$$dT = \frac{p}{nR}dV + \frac{V}{nR}dp = \frac{T}{pV}(pdV + Vdp) \quad (11)$$

De las ecuaciones (3) y (1) se deduce que:

$$C_V = \frac{1}{n} \cdot \frac{dQ - pdV}{dt} \quad (12)$$

La energía  $dQ$  es suministrada al gas por el calentador eléctrico:

$$dQ = U \cdot I \cdot dt \quad (13)$$

## Tarea 1 (2/5)

PHYWE

En este caso,  $U$  es la tensión que se aplica a los cables del calentador,  $I$  es la corriente que fluye a través de los cables del calentador y  $dt$  es el periodo de tiempo de la medición.

Con las ecuaciones (11) y (13) se obtiene:

$$C = \frac{p \cdot V}{n \cdot T} \cdot \frac{U \cdot I \cdot dt - p \cdot dV}{p \cdot dV + V \cdot dp} \quad (14)$$

donde  $dV$  es el cambio de volumen debido a la subida del aceite en el manómetro.

El tubo indicador del manómetro tiene un radio  $r = 2 \text{ mm}$  y una longitud  $l = 140 \text{ mm}$ . La variación de presión por longitud es, por tanto, la siguiente  $1/70 \text{ hPa} \cdot \text{mm}^{-1}$  y el cambio correspondiente en el volumen es, por lo tanto:

$$dV = a \cdot dp \quad (15)$$

## Tarea 1 (3/5)

PHYWE

$$\text{donde } a = \pi r^2 \cdot 70 \frac{\text{mm}}{\text{hPa}} = 880 \frac{\text{mm}^3}{\text{hPa}} = 8.8 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{hPa}} \quad (16)$$

$$\text{así } C_V = \frac{pV \cdot (dQ - a \cdot p \cdot dp)}{n \cdot T \cdot (a \cdot p + V) \cdot dp} \quad (17)$$

El volumen molar de un gas a presión estándar  $p_0 = 1013 \text{ hPa}$  y  $T_0 = 273.2 \text{ K}$  es  $V_0 = 22.414 \text{ l/mol}^{-1}$ .

El volumen molar es:

$$V_{\text{mol}} = \frac{p_0 \cdot V_0 \cdot T}{T_0 \cdot p} \quad (18)$$

De acuerdo con lo siguiente, el número de moles en el volumen  $V$  es:  $n = \frac{V}{V_{\text{mol}}} \quad (19)$

## Tarea 1 (4/5)

PHYWE

Teniendo en cuenta las ecuaciones (18) y (19), se deduce que

$$C_V = \frac{p_0 \cdot V_0}{T_0} \cdot \left( \frac{U \cdot I \cdot dt}{(ap + V) \cdot dp} - \frac{ap}{ap + V} \right) \quad (20)$$

La pendiente de la regresión lineal en la Fig. 6 es igual a

$$\frac{dp}{dt} = 0.518 \frac{\text{hPa}}{\text{s}}$$

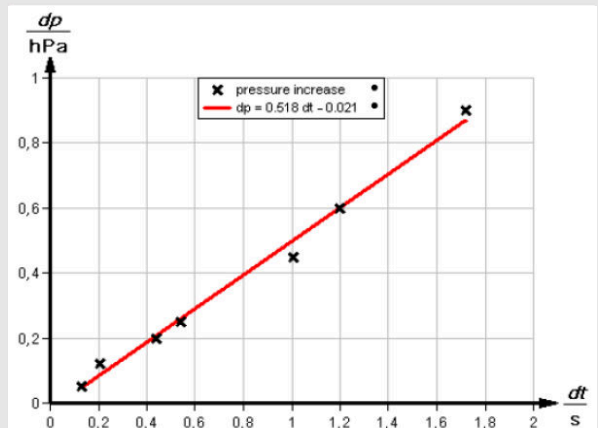


Fig. 6: Cambio de presión  $dp$  en función del tiempo de calentamiento  $dt$  con  $U = 4,59 \text{ V}$ ,  $I = 0,43 \text{ A}$ .

## Tarea 1 (5/5)

PHYWE

$C_V$  puede calcularse mediante la ecuación (20) si se tiene en cuenta la ecuación (16).

Con  $p = 1011 \text{ hPa}$ ,  $V = 101$ ,  $U = 4,59 \text{ V}$  e  $I = 0,43 \text{ A}$  el siguiente valor para  $C_V$  se obtiene:

$$C_V = 21.67 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \pm 5 \% (21)$$

## Tarea 2 (1/3)

PHYWE

A presión constante el aumento de temperatura  $dT$  induce un aumento de volumen  $dV$ . De la ecuación de estado de los gases ideales se deduce que

$$dV = \frac{nR}{p} dt = \frac{V}{T} dT (22)$$

Teniendo en cuenta la ecuación (2), de las ecuaciones (13) y (22) resulta lo siguiente

$$C_p = \frac{1}{n} \cdot \frac{U \cdot I \cdot dt \cdot V}{dV \cdot T} (23)$$

$C_p$  puede calcularse mediante la ecuación (23) teniendo en cuenta (18) y (19):

$$C_p = \frac{p_0 \cdot V_0}{T_0} \cdot \left( \frac{UI}{p} \right) \cdot \left( \frac{dt}{dV} \right) (24)$$

## Tarea 2 (2/3)

PHYWE

La pendiente de la regresión lineal en la Fig. 7 es igual a

$$\frac{dV}{dT} = 4.53 \frac{\text{ml}}{\text{s}}$$

con  $U = 4,49 \text{ V}$  e  $I = 0,38 \text{ A}$ .

De lo cual se desprende  $C_p = 30.98 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \pm 7\%$ (25)

Como consecuencia de las pérdidas de calor hacia el entorno, los valores experimentales de  $C_V$  y  $C_P$  son algo mayores que los valores teóricos. La diferencia entre las capacidades térmicas molares proporciona el valor de  $R$ . Los resultados experimentales dan

$$R = C_p - C_V = 9.31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \pm 9\%$$

Que es congruente con el valor dado en la literatura de  $R = 8.3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

## Tarea 2 (3/3)

PHYWE

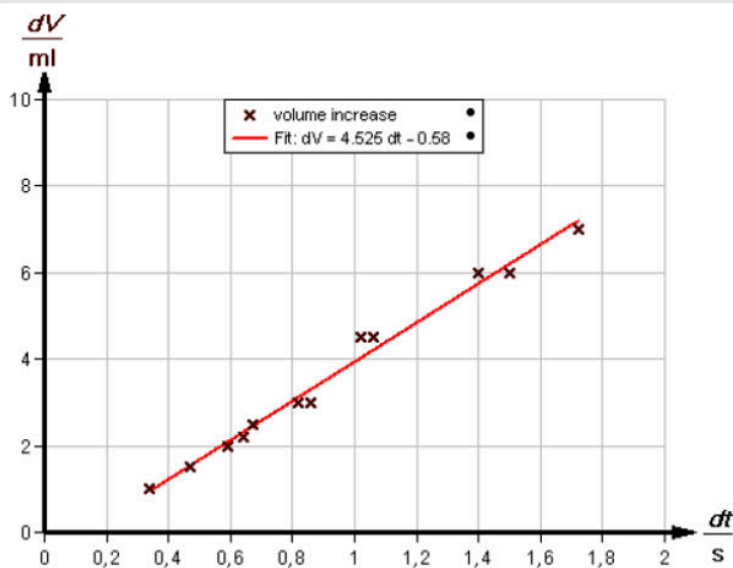


Fig. 7: Cambio de volumen  $dV$  en función del tiempo de calentamiento  $dt$  con  $U = 4,49 \text{ V}$  e  $I = 0,38 \text{ A}$ .

## Conclusión:

PHYWE

### Valores literarios:

$$C_{p(\text{Oxygen})} = 29.4 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$C_{V(\text{Oxygen})} = 21.1 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$C_{p(\text{Nitrogen})} = 29.1 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$C_{V(\text{Nitrogen})} = 20.8 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

### Resultados experimentales:

$$C_{p(\text{air})} = 31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$C_{V(\text{air})} = 22 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

### Nota

Con este aparato también se pueden medir otros gases (por ejemplo, dióxido de carbono o argón). Estos gases se introducen a través de la llave de paso situada en el fondo del recipiente.